

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ**

Шамиева А.Р., Лопатин И.В., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Толкачев О.С., Шугуров В.В.

Научный руководитель: Иванов Ю.Ф., профессор, д.ф.-м.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: shamieva\_nastya@mail.ru

**DEVELOPMENT OF THE COMBINED METHOD OF HARDENING OF THE SURFACE OF ALUMINIUM**

Shamieva A.R., Lopatin I.V., Petrikova E.A., Teresov A.D., Tolkachev O.C., Shugurov V.V.

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Ivanov Yu.F.

Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: shamieva\_nastya@mail.ru

*Представлены результаты, полученные при исследовании фазового и элементного состава, дефектной субструктуры поверхности технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комбинированной обработке, сочетающей напыление металлической пленки, электронно-пучковое перемешивание системы пленка/подложка и последующее азотирование в плазме газового разряда низкого давления. Выполнен анализ закономерностей, выявлены режимы воздействия, позволяющиекратно повышать микротвердость и износостойкость материала.*

*The results are presented, received at research of phase and elemental composition, defective substructure of surface technically pure aluminium of the A7, subjected to the combined processing combining spraying metal film, electron-beam mixing of system film/substrate and subsequent nitriding in plasma of the gas discharge of low pressure. The analysis of regularities is made, revealed the modes of influence allowing multiple to raise a microhardness and wear resistance of material.*

Алюминий и его сплавы широко используются в промышленности благодаря достаточно большой удельной прочности, удовлетворительной коррозионной стойкости и хорошей обрабатываемости механическими методами [1]. Однако наряду с этими преимуществами алюминий обладает малой твердостью и невысокой износостойкостью, что существенно сужает сферу его применения. Диффузионное насыщение поверхности алюминия ионами азота позволяет в той или иной мере минимизировать эти недостатки, однако для реализации процесса азотирования алюминия необходимо решить ряд специфических проблем [2]. Во-первых, сокращение длительности процесса азотирования. Широкие возможности в этом направлении дает повышение температуры насыщения, однако высокотемпературное азотирование сопровождается существенным понижением твердости диффузионного слоя и детали в целом. Во-вторых, присутствие на поверхности алюминия и его сплавов оксидной пленки, препятствующей поступлению азота на обрабатываемую поверхность, – необходима эффективная очистка поверхности в процессе азотирования. В-третьих, формирование на поверхности образца пленки нитрида алюминия, которая препятствует поступлению азота вглубь образца и не позволяет сформировать протяженные упрочненные слои.

Одним из направлений решения указанных проблем является разработка методов азотирования в плазме газового (дугового) разряда низкого давления [3]. В этом подходе налетающий поток плазмы позволяет распылять тонкий поверхностный слой, интенсифицируя процесс проникновения азота в объем образца. Проблема, затрудняющая развитие данного подхода, – нитрид алюминия, являясь диэлектриком, осложняет подачу потенциала на обрабатываемое изделие в процессе ионного азотирования. Наличие диэлектрической пленки на азотируемой поверхности приводит к тому, что заряд ионов не может стекать во внешнюю цепь и накапливается на поверхности, что приводит к электрическому пробое пленки нитрида алюминия и ее разрушению с образованием катодного пятна на обрабатываемой поверхности. Для преодоления указанной проблемы в настоящей работе на поверхность образцов алюминия перед

азотированием напыляли тонкий (0,5 мкм) слой сплава 12Х18Н10Т. После напыления часть образцов (система пленка/подложка) облучалась интенсивным электронным пучком для сплавления пленки в подложку.

Целью настоящей работы является анализ структуры и свойств алюминия, подвергнутого комбинированной обработке, включающей напыление пленки сплава 12Х18Н10Т, облучение интенсивным электронным пучком и, на завершающей стадии, насыщение поверхностного слоя материала азотом.

В качестве модифицируемого материала использовали технически чистый алюминий марки А7. Комбинированная обработка алюминия проводилась в три этапа: 1) формирование пленки сплава 12Х18Н10Т (модернизированная установка ионно-плазменного напыления «Квинта»); 2) облучение системы «пленка (сплав 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО»); 3) азотирование модифицированной поверхности алюминия (установка ННВ-6.6-И1, дооснащенная плазмогенератором «ПИНК»), температура азотирования 540 °С, длительность азотирования 8 часов. Механические испытания модифицированной поверхности осуществляли, определяя микротвердость (прибор ПМТ-3, метод Виккерса) при нагрузках на индентер 0,2 Н и 0,5 Н, нанотвердость и модуль Юнга (ультрамикротвердомер Shimadzu DUH-211S; нагрузка на индентор изменялась в интервале от 10 мН до 300 мН). Трибологические испытания модифицированной поверхности осуществляли на трибометре «CSEM Tribometer High Temperature S/N 07-142», CSEM Instruments, Швейцария; скорость износа оценивали по площади поперечного сечения трека износа, используя 3D-профилометр MICROMEASURE 3D station французской фирмы STIL. Дефектную структуру материала изучали методами оптической (микроскоп «Микровизор металлографический  $\mu$  Vizo - MET-221»), сканирующей (сканирующий электронный микроскоп "SEM-515 Philips") и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F JEOL) электронной микроскопии. Элементный состав поверхностного слоя определяли методами микрорентгеноспектрального анализа (микроанализатор EDAX ECON IV, являющийся приставкой к электронному сканирующему микроскопу SEM-515 «Philips»). Анализ фазового состава, состояния кристаллической решетки, величины микронапряжений, размера областей когерентного рассеяния поверхностного слоя выполняли методами дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония).

Выполнены исследования структуры поверхности образцов технически чистого алюминия, подвергнутых комбинированной обработке, включающей напыление пленки сплава 12Х18Н10Т, облучение интенсивным электронным пучком и, на завершающей стадии, насыщение поверхностного слоя материала азотом. Выявлено формирование островковой структуры с размерами островков до 5 мкм (рис. 1, а). Размеры субструктуры островков изменяются в пределах от 100 нм до 500 нм (рис. 1, б). Основной причиной формирования островковой структуры при азотировании в плазме газового разряда низкого давления является бомбардировка поверхности материала ионами плазмы, что сопровождается растравливанием поверхностного слоя образца.

Исследования фазового состава модифицированного слоя алюминия, выполненные методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, позволили выявить в поверхностном слое многофазное состояние, основными фазами которого являются нитрид алюминия AlN ( $\approx 75$  мас.%) и алюминий. Показано, что в слое, прилегающем к поверхности модифицирования, размеры частиц второй фазы (100-250) нм. При удалении от поверхности модифицирования на расстояние (5-10) мкм выявляются области, содержащие частицы нитрида алюминия, размеры которых (2-5) нм.

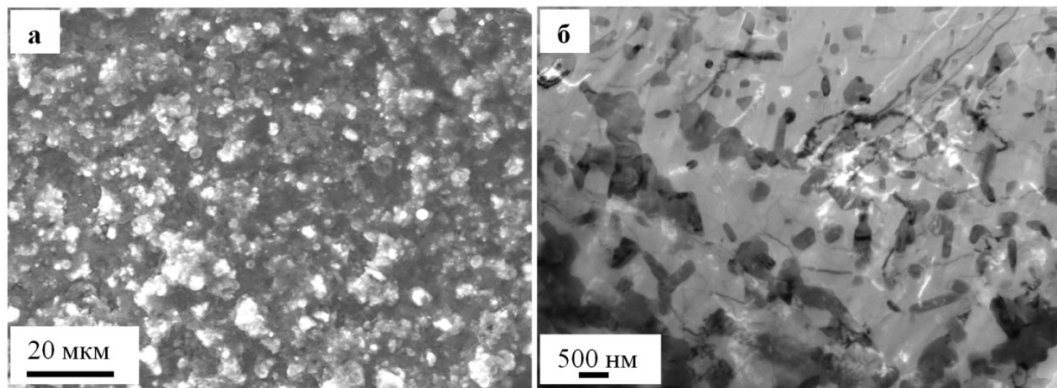


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности (а) и приповерхностного слоя (б) технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комбинированной обработке, заключающейся в облучении электронным пучком ( $16 \text{ кВ}$ ,  $30 \text{ Дж/см}^2$ ,  $200 \text{ мкс}$ ,  $0,3 \text{ с}^{-1}$ ,  $10 \text{ имп.}$ ) системы «пленка (сплав 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» и последующем азотировании в плазме газового разряда низкого давления; а – сканирующая электронная микроскопия; б – просвечивающая дифракционная электронная микроскопия

Выполнены трибологические испытания модифицированных образцов технически чистого алюминия А7. Показано, что наиболее высокие результаты обнаруживаются для следующего режима модифицирования: азотирование (температура  $540 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (8 час.), ток  $120 \text{ А}$ , напряжение  $250 \text{ В}$ , давление газа  $0,9 \text{ Па}$ ) комплексно легированного поверхностного слоя, сформированного путем облучения системы «пленка (сплав 12Х18Н10Т,  $0,5 \text{ мкм}$ ) / (А7) подложка» интенсивным электронным пучком ( $30 \text{ Дж/см}^2$ ,  $200 \text{ мкс}$ ,  $20 \text{ имп.}$ ,  $0,3 \text{ с}^{-1}$ ). А именно, выявлено увеличение износостойкости в  $\approx 9$  раз и снижение коэффициента трения в  $\approx 1,3$  раза. Методами наноиндентирования установлено, что толщина упрочненного слоя при данном режиме модифицирования достигает  $30 \text{ мкм}$ . Твердость поверхностного слоя более чем в 4 раза превышает твердость исходного материала.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00091).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – М.: Изд-во МИСиС, 2010. – 510 с.
2. Будилов В.В., Коваль Н.Н., Киреев Р.М., Рамазанов К.Н. Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов. – М.: Машиностроение, 2013. – 320 с.
3. Ivanov Yu.F., Akhmadeev Yu.H., Lopatin I.V., Petrikova E.A., Krysina O.V., Koval N.N. Structure and properties of commercially pure titanium nitrided in the plasma of a low-pressure gas discharge produced by a PINK plasma generator // Journal of Physics: Conference Series 652 (2015) 012013.